

# KOH 溶液无掩膜腐蚀加工硅对称梁技术研究\*

李昕欣 鲍敏杭 沈绍群

(复旦大学电子工程系传感器研究室 上海 200433)

**摘要** 本文介绍了利用 KOH 腐蚀液对硅台阶、台面等三维结构进行无掩膜腐蚀的新技术。应用该技术可以制作出仅用常规各向异性腐蚀所无法形成的微机械结构, 从而使腐蚀工艺的灵活性大为增加。通过分析与计算, 给出了无掩膜腐蚀过程中三维结构的变化规律, 并通过大量实验证实了这些规律。利用该工艺已成功地制作了一种微机械硅电容加速度传感器用的对称梁—质量块结构。这种结构的特点是梁的中平面与质量块质心位于同一水平面上, 从而能消除相关的横向寄生灵敏度效应。

EEACC: 2550

## 1 引言

在硅微结构传感器的制作中, 各向异性腐蚀技术已经被广泛使用了很长一段时间。由于该工艺有良好的方向选择性, 所以已成为微机械加工的主要手段之一。如采用一般的腐蚀方法, 则被腐蚀的初试表面是平面。可以利用一定的掩膜图形来规定被选择腐蚀的区域。掩膜一般是在(100)晶面上由<110>方向的边构成图形, 然后经腐蚀后形成平膜、岛膜等结构。显然这样腐蚀形成的底面处于一个平面上。但是在很多情况下, 需要使被腐蚀的底面上不同区域位于不同平面上, 即腐蚀底面上存在台阶, 且台阶的上平面不在硅片的表面处。例如在制作用于硅电容加速度计的梁-质量块结构时, 一般的腐蚀加工方法只能将悬臂梁制作于硅片的一个表面上<sup>[1]</sup>。如图 1(a)所示, 由于梁的中平面与惯性质量块的重心不在同一水平面上, 将会引入明显的横向寄生灵敏度效应。为消除该效应, 一种方法是利用掺杂浓硼区域的腐蚀自终止效应来形成双面支撑梁结构<sup>[2]</sup>, 见图 1(b)。但浓硼扩散不仅给工艺带来诸多不便, 而且浓硼区存在较大的结构内应力<sup>[3]</sup>, 使梁的力学性能变差, 另外梁的厚度将受到硼扩散工艺的限制, 所以该结构难以实际应用。如能通过双面腐蚀将梁制作在硅片的中面附近, 见图 1(c), 则是较理想的。但如沿用传统的腐蚀方法, 即先通过双面腐蚀形成对称的膜-质量块结构, 再氧化并对远低于硅片表面的膜表面光刻出梁的掩膜图形, 经进一步腐蚀原则上也可形

\* 国家八五科技攻关和国家自然科学基金资助项目

李昕欣 男, 1965 年生, 工程师, 博士研究生, 目前从事半导体器件物理和集成传感器方面的研究

鲍敏航 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE 高级会员, 目前从事半导体器件物理和集成传感器方面的研究与教学

1995 年 3 月 19 日收到初稿, 1995 年 11 月 6 日收到修改稿

成位于中平面的梁。但将掩膜版上的图形转移到较深的沟槽下的平面上是很难实现的,且由于一般膜的厚度(即梁的厚度)远小于硅片的厚度,此时实施光刻工艺易使膜结构机械损坏。所以这种方法实际上是不可行的。

一个可行的方法是先在硅片两面(或一面)光刻并根据设计腐蚀出一定厚度的“梁体”,显然这时的“梁体”位于硅片表面处,其侧面为(111)面。此后再光刻去除“梁体”上的掩膜继续进行腐蚀。在形成质量块过程的同时,原位于表面的“梁”就被推向硅片的中平面附近。在这个过程中,“梁”的上表面和侧面都要受到溶液的腐蚀,即三维的台阶结构在无掩膜的情况下受到腐蚀。与有掩膜腐蚀的凸角削角现象类似,无掩膜腐蚀进行时台阶的(111)侧面会受到快腐蚀面的侵蚀而出现“削边”现象。腐蚀后形成的结构与原掩膜比较,在形状和尺寸上都将有一定的偏离。因此只有掌握了这些变化的规律,才有可能加以利用。

由于对三维结构的无掩膜腐蚀特性研究尚未见报道,本文首先分析该种腐蚀进行时几何图形的变化规律,利用这些规律可以预见无掩膜腐蚀后图形的变化,通过设计合适的掩膜版图形,使得最终能得到所要求的图形。分析之后将给出验证规律的实验结果,并介绍利用无掩膜腐蚀制成的对称梁-质量块结构。

## 2 腐蚀过程硅结构参数分析

在对(100)晶面硅片进行各向异性腐蚀时,掩膜窗口的边一般沿<110>方向,腐蚀后在掩膜边缘处会形成台阶,台阶侧面为腐蚀速率最低的(111)面。如在腐蚀一定深度 $h$ 之后将掩膜去除,再对上表面暴露的台阶继续进行无掩膜腐蚀,我们分析这种情况下台阶几何形状的变化。

图2(见图版I)显示了硅的晶格坐标及一些相关晶面。原掩膜边沿CB和CD方向,腐蚀向下沿Z方向进行,∠BCD为凸方角。经一段时间的有掩膜腐蚀后形成台阶CH为两侧面在角处的交线,侧面BCHG、DCHG'是(111)面。在去除表面BCD上的掩膜后,构成凸棱BC、CD的上平面和侧面都暴露出来了。进一步腐蚀,在凸棱上就会暴露某些高腐蚀速率的晶面<sup>[4,5]</sup>,我们最后证明该面只有一个即(311)面,对应于图2中为ABE面。也就是说在无掩膜腐蚀进行中,伴随着纵深向下的腐蚀,凸棱上将出现腐蚀速率最大的(311)面,该面的出现与发展将改变原台阶的形状。因此凡是凸棱或凸棱相交形成的凸角处将出现侧向的削边或削角现象,侧向的削蚀与向下的腐蚀一起构成了三维的腐蚀效果。下面分别对边棱和凸角两种情况进行分析。

### 2.1 边棱情况

图3(见图版I)为垂直于<110>边棱的台阶截面示意图。RPCS为有掩膜腐蚀形成的台阶,上平面CS处有掩膜,侧面为(111)面,并设台阶高度为 $h$ 。在去除CS处掩膜后继续腐蚀,则TM代表的(311)面对顶面和侧面都进行削蚀。(311)面与水平的(100)面夹角为 $\theta=$

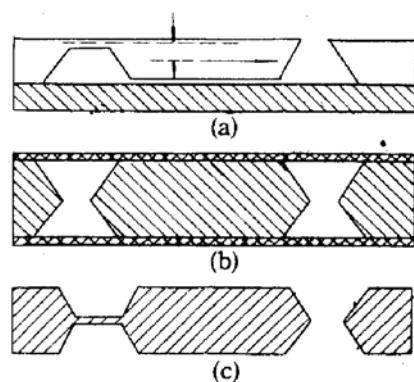


图1 三种梁-质量块结构  
(a)非对称梁结构; (b)浓硼双面梁结构;  
(c)非浓硼对称梁结构。

$\operatorname{tg}^{-1}(\sqrt{2}/3) \approx 25.24^\circ$ . 设 KOH 对(311)面与对(100)面的腐蚀速率之比为  $r_3$ , 由图 3 可见在向下腐蚀与侧向削边腐蚀的共同作用下, 台阶的边棱会向后退移, 退移量为:

$$CM' = r_3 \cdot d / \sin\theta - d / \operatorname{tg}\theta \approx (2.345r_3 - 2.121)d \quad (1)$$

式中  $d$  为无掩膜腐蚀的深度. (311)面与原台阶侧面(111)的交线对应于图 3 中 T 点, 该点相对于棱初始位置(对应于图 3 中 C 点)的水平距离为:

$$TQ = r_3 d \cdot \cos\alpha / \sin(\alpha - \theta) \approx 1.173r_3 d$$

其中  $\alpha = \operatorname{tg}^{-1}\sqrt{2} \approx 54.74^\circ$ . 而(111)面与底面交线处 P' 相对于 C 点的水平距离为:

$$P'Q' = (h + d) / \operatorname{tg}\alpha \approx 0.707(h + d)$$

当  $TQ = P'Q'$  时, 刚好是(311)面完全削去(111)面的临界情况, 此时的无掩膜腐蚀深度为:

$$d^0 \approx h / (1.658r_3^3 - 1)$$

在  $d < d_0$  时, 台阶侧面由(311)面和(111)面连接构成, 台阶的横向总宽度为:

$$W = P'T'' + TM \cdot \cos\theta \approx 0.707h + (2.345r_3 - 1.414)d \quad (2)$$

在  $d \geq d_0$  时, (111)面完全消失, 台阶侧面为(311)面, 台阶的水平宽度达到饱和值  $2.12h$ .

## 2.2 凸角情况

另一种常见的情况是三维结构中存在由有掩膜腐蚀形成的方凸角, 如在制作矩形岛时所遇到的情况. 参考图 2,  $\angle BCD$  为方凸角上沿的角, 根据文献[6], 其两个削角面都是(411)面, 图中 BIJK 面为其中的一个, 其对应于上表面的削角棱 BN 沿<410>方向, N 点在  $\angle BCD$  的角分线上. (411)面与(100)面夹角  $\varphi = \cos^{-1}(1/\sqrt{18}) \approx 76.37^\circ$ . 在有掩膜腐蚀的情况下, 设腐蚀深度为  $h$ , BN 的水平推进距离为  $r_4 h / \sin\varphi$ , 这里  $r_4$  为(411)面与(100)面腐蚀速率之比. N 点到线 BC 的距离为:

$$NN' = r_4 h / [\sin\varphi \cdot \cos\beta / \cos(\pi/4)] = 3r_4 h / 4$$

其中 角  $\beta = \operatorname{tg}^{-1}(1/4)$ , 由图 2 所示. 在无掩膜腐蚀情况下, (411)面的削角作用仍然存在, 与有掩膜腐蚀时所不同的是凸角顶面同时向下腐蚀. 设无掩膜腐蚀深度为  $d$ , 做类似于(1)式的推导, N 沿<110>方向的水平推进距离为:

$$NN' = (r_4 - \cos\varphi)d / (\sqrt{2} \sin\varphi \cdot \cos\beta) \approx (3r_4/4 - 0.177)d \quad (3)$$

NN' 与削棱面(311)造成的边棱退移量 CM' 相比较, 如果  $NN' > CM'$ , 随着无掩膜腐蚀的进行, 无掩膜腐蚀开始时, 对应于无削角或有削角的情况, 腐蚀后削角会出现或扩大. 反之如果  $NN' < CM'$ , 则削角将不出现或变小直至消失. 将式(1)和(3)相比较, 令  $NN' = CM'$ , 解得  $r_3$  的临界表达式为:

$$r_{30} = 0.320r_4 + 0.829$$

即当  $r_3 < r_{30}$  时, 削角出现或增大; 而反之则削角不出现或减小. 在实际中被使用的 KOH 腐蚀液浓度范围从 25% 到 50%, 根据文献[6], 此范围内  $r_4$  值从 1.47 变化到 1.28, 相应得到  $r_{30}$  值从 1.30 到 1.24, 而我们试验得到的  $r_3$  值范围从 1.85 到 1.49, 这样确保了  $r_3$  值比  $r_{30}$  大很多. 因此, 如果原来无削角, 在无掩膜腐蚀后削角不会产生; 即使原来有削角, 随无掩膜腐蚀进行, 削角会减小, 当无掩膜腐蚀深度足够大时, 削角会消失. 对于先进行有掩膜腐蚀(深度为  $h$ , 无削角补偿)而后进行无掩膜腐蚀(深度为  $d$ )的整个过程, 考虑(411)面的削角作用时应将两个 NN' 的表达式相加计算. 欲使削角消失应满足不等式:

$$(r_3 - \cos\theta)d / \sin\theta \geq [r_4 h + (r_4 - \cos\varphi)d] / (\sqrt{2} \sin\varphi \cdot \cos\beta)$$

或表达为所要求的最小无掩膜腐蚀深度:

$$d_{\min} = r_4 h / (3.127r_3 - r_4 - 2.593) \quad (4)$$

当 KOH 溶液浓度从 25% 到 50% 变化时, 相应的临界深度  $d_{\min}$  值在  $0.85h$  到  $1.63h$  之间.

### 3 实验结果与讨论

腐蚀实验使用带搅拌的恒温水浴装置, 温度控制误差为  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ , 用读数显微镜对样品尺寸进行测量. 实验共选用八种浓度的 KOH 溶液, 浓度范围按重量比从 25% 到 60%; 选择  $40, 50, 60^\circ\text{C}$  三个腐蚀温度; 台阶高度从  $10\mu\text{m}$  到  $40\mu\text{m}$ . 实验数据与前述计算结果有较好的吻合.

无掩膜实验表明, 随溶液浓度增加,  $\langle 110 \rangle$  台阶上边棱退移速率与沿  $\langle 100 \rangle$  向下腐蚀速率之比值下降; 而在实验选择的整个温度区间, 该比值不随温度升降而变化. 图 4(见图版 I) (a) 中两条折线为按公式(2)计算的台阶(高度分别为  $21, 30\mu\text{m}$ )经无掩膜腐蚀后台阶宽度在水平方向展宽的规律, 即先线性地变宽, 而后达到饱和值后不再变化. 实验数据与之有较好的吻合. 由台阶宽度的饱和值为腐蚀前的三倍这一事实也可以辅助证明最后的台阶侧面被  $(311)$  面占据.

根据实验得到了在整个被选取的 KOH 溶液浓度范围内无掩膜腐蚀台阶上边棱退移量与向下腐蚀深度之比值. 该比值随浓度增加从 2.23 下降到 0.91. 利用该比值, 并根据公式(1), 推导出 KOH 溶液对  $(311)$  面与对  $(100)$  面腐蚀速率的比值  $r_3$  与 KOH 溶液浓度之间的关系. 从图 4(b) 可见, 当 KOH 溶液浓度从 25% 增加到 60%,  $r_3$  值从 1.85 减小到 1.29.

利用无掩膜腐蚀台阶边棱的退移规律, 我们成功设计并制作了前述的对称梁-质量块结构和硅电容加速度敏感元件. 整个元件用静电键合形成 玻璃-硅-玻璃三层结构, 两面的玻璃上溅射形成金属电极作为电容的固定电极板. 中间的硅上制作有敏感梁和质量块, 质量块的两面作为可动极板, 与固定极板形成一对差动电容. 硅片部分的制作工艺如下:

1) N 型  $\langle 100 \rangle$  双面抛光硅片厚度为  $350\mu\text{m}$ . 第一次氧化后进行双面对准光刻, 腐蚀三微米形成电容间隙及电极引线通道.

2) 第二次氧化后从硅片两面分别光刻形成质量块和“梁”区掩膜, 然后进行双面腐蚀, 深度各为梁厚的一半(当梁厚远小于质量块厚度时, 也可以只从一面腐蚀, 深度等于梁厚). 质量块四周除“梁”区以外也同时腐蚀出沟槽. 在设计“梁体”的掩膜宽度时, 必须根据无掩膜腐蚀规律计算和预留“梁”被推向硅片中面过程中由于台阶退移造成的宽度减少量, 以使最终能获得所需要的梁宽.

3) 第三次氧化后分别对硅片两面光刻, 保留质量块上和边框上的掩膜, 而将“梁”上的掩膜去掉. 然后利用无掩膜腐蚀工艺, 在质量块四周向下腐蚀的同时, “梁体”从硅片表面下潜. 当质量块四周腐蚀穿透即质量块形成时, 梁就最终形成在硅片的中平面附近.

图 5(见图版 I) 为已制作好的梁-质量块结构在梁和质量块相连接区域的 SEM 照片. 在其右上角处为受无掩膜腐蚀正在下潜的“梁体”台阶截面一侧的 SEM 照片, 可以看出侧面为一个面即最快腐蚀面, 说明此时该面已将原台阶的  $(111)$  侧面完全削去. 利用 SEM 设备显示屏上的标尺对台阶侧面的水平宽度和高度分别进行测量, 然后计算出该侧面与水平底面夹角为  $25.56^\circ$ , 与  $(311)$  面和  $(100)$  面夹角  $\theta = 25.24^\circ$  相吻合, 证明该最快腐蚀面为  $(311)$ .

面。我们还利用 2900 型  $\alpha$ -Step 台阶测试仪对台阶侧面进行测量,结果也表明该侧面为(311)面。

此外,我们也对凸角结构进行了无掩膜实验。实验分两类进行,一类是在形成方岛凸角的腐蚀掩膜上带有过补偿的〈110〉条状补偿图形<sup>[7]</sup>的情况下进行的,即在台阶形成时〈110〉条还未被消耗尽,见图 6(a)的 SEM 照片(图 6 见图版 I)。另一类实验是在没有削角补偿图形的掩膜下腐蚀,形成的凸角存在削角,见图 6(c)的 SEM 照片。对于过补偿的情况,随无掩膜腐蚀的进行,剩余的补偿图形由于(311)面的侧向削蚀作用而很快地消失,然后呈现没有削角的理想方岛,并且完整的方角将一直保持下去,显示于图 6(b)的 SEM 照片中。而对于原已存在削角即有掩膜腐蚀时无削角补偿或欠补偿的凸角,随无掩膜腐蚀的进行,正如上一节所分析的,由于受到比削角作用更强烈的削边作用,削角变得越来越小直至完全消失,显示于图 6(d)的 SEM 照片中。另外,用 KOH 溶液进行有掩膜腐蚀时所采用的削角补偿往往只能将凸角的上平面角补成方角,而从图 6(b)和(d)中可以看到无掩膜形成的凸角不只上平面角是方的,而且下平面角也是完全方的。所以在利用无掩膜腐蚀形成诸如下潜方岛等结构时,在先前形成台阶的有掩膜腐蚀掩膜设计中,只需对每个凸角设计一个要求不太严格的补偿图形即可;在无掩膜腐蚀深度足够大的情况下,甚至可以不采用削角补偿技术。

## 4 结论

本文提出了一种新颖的 KOH 溶液对硅三维结构的无掩膜腐蚀技术,着重分析了腐蚀过程中硅台阶结构的变化规律,并用大量的实验证明了这些规律,证明了形成侧向削蚀的最快腐蚀面为(311),实验也得到了  $r_3$  与 KOH 溶液浓度间的关系。利用该腐蚀技术,成功地制作出对称梁-质量块结构。事实上就立体加工与平面加工相比较而言,无掩膜腐蚀是比常规有掩膜腐蚀更具普遍性的工艺。随着对该技术及腐蚀特性认识的加深,并加以利用,会有更多的硅微机械结构被制作出来并应用于微传感器和执行器中。

## 参 考 文 献

- [1] S. Suzuki, S. Tuchitani, K. Sato *et al.*, Sensors and Actuators, 1990, A21: 316~319.
- [2] H. Seidel, H. Riedel, R. Kolbeck *et al.*, Sensors and Actuators, 1990, A21: 312~315.
- [3] X. Ding, W. Ko and J. M. Mansour, Sensors and Actuators, 1990, A21: 866~871.
- [4] R. A. Buser and N. F. de Rooij, Sensors and actuators, 1991, A28: 71~78.
- [5] E. Herr and H. Baltes, Proc. of the 6th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, San Francisco, USA, June 24~27, 1991, 807~810.
- [6] G. K. Mayer, H. L. Offereins, H. Sandmaier *et al.*, Journal of Electro-chemical Society, 1990, 137: 3947~3951.
- [7] M. Bao, Chr. Burrel, J. Esteve *et al.*, Sensors and Actuators, 1993, A37: 727~732.

## Study on Maskless Etching of Silicon Symmetric Beam-Mass Structure in Aqueous KOH

Li Xinxin, Bao Minhang and Shen Shaoqun

(Sensor Research Laboratory, Dept. of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)

Received 19 March 1995, revised manuscript received 16 November 1995

**Abstract** A novel micromechanical technique by using maskless etching of three dimensional silicon structures is investigated. With the technique, some micro-structures which are hardly fabricated by conventional anisotropic etching can be formed. Therefore, the technique makes anisotropic etching processes more flexible. Analytical relations have been found to predict the evolution of the contours of the three dimensional structures. And the relations have been conformed by the experimental results. As an example of applications, a symmetric cantilever beam-mass structure which plays an important role in a miniature silicon capacitive accelerometer has been successfully fabricated by using the maskless etching technique. In the structure, the beams are located at the central plane of the mass, so that the lateral cross-sensitivity effect of the accelerometer can be eliminated.

**EEACC:** 2550